

UTILISATION DES STRUCTURES GÉOTECHNIQUES POUR L'EXTRACTION D'ÉNERGIE DANS LES ROUTES

Par Dr F. Dupray, Prof. L. Laloui,
C. Schurmann, S. Minon

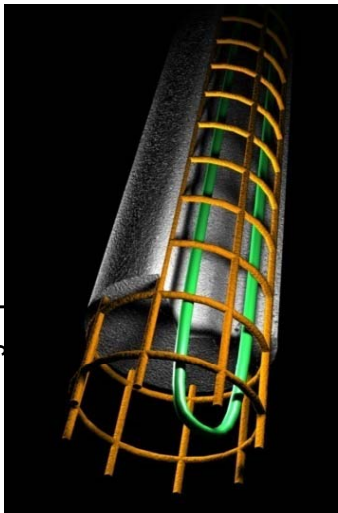
Plan

- Principes et usages des géostructures énergétiques
- Extensions possibles aux infrastructures routières
- Exemples d'applications
- Étude de 2 cas d'ancrages échangeurs de chaleur:
 - Tranchée couverte
 - Tunnel urbain
- Évaluation des systèmes pour tunnels
- Conclusions

Systèmes de génie civil thermo-actifs: une technologie écologique de chauffage et de refroidissement



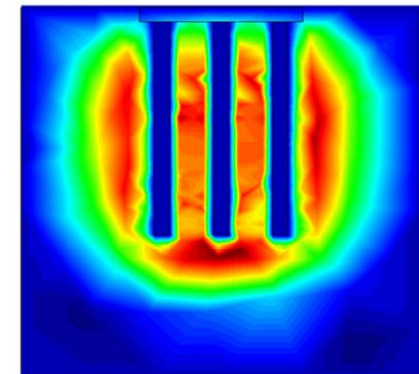
Frankfurt Main Tower



Heat exchanger pile

- La **baisse** de l'**impact** environnemental des constructions et **développement** des **énergies renouvelables** est un élément crucial pour le développement durable
- **Les géostructures énergétiques** peuvent couvrir jusqu'à 75% des besoins d'énergie de chauffage d'un bâtiment de manière renouvelable, propre, et avec des ressources disponibles (cas du nouveau terminal de l'aéroport de Zurich).
- **La réduction des émissions de CO2** par l'utilisation des géostructures énergétiques est de 45 à 10%

**L'expertise acquise est à la
pointe de la connaissance des
couplages multi-physiques et
de l'interaction sol-fondation**

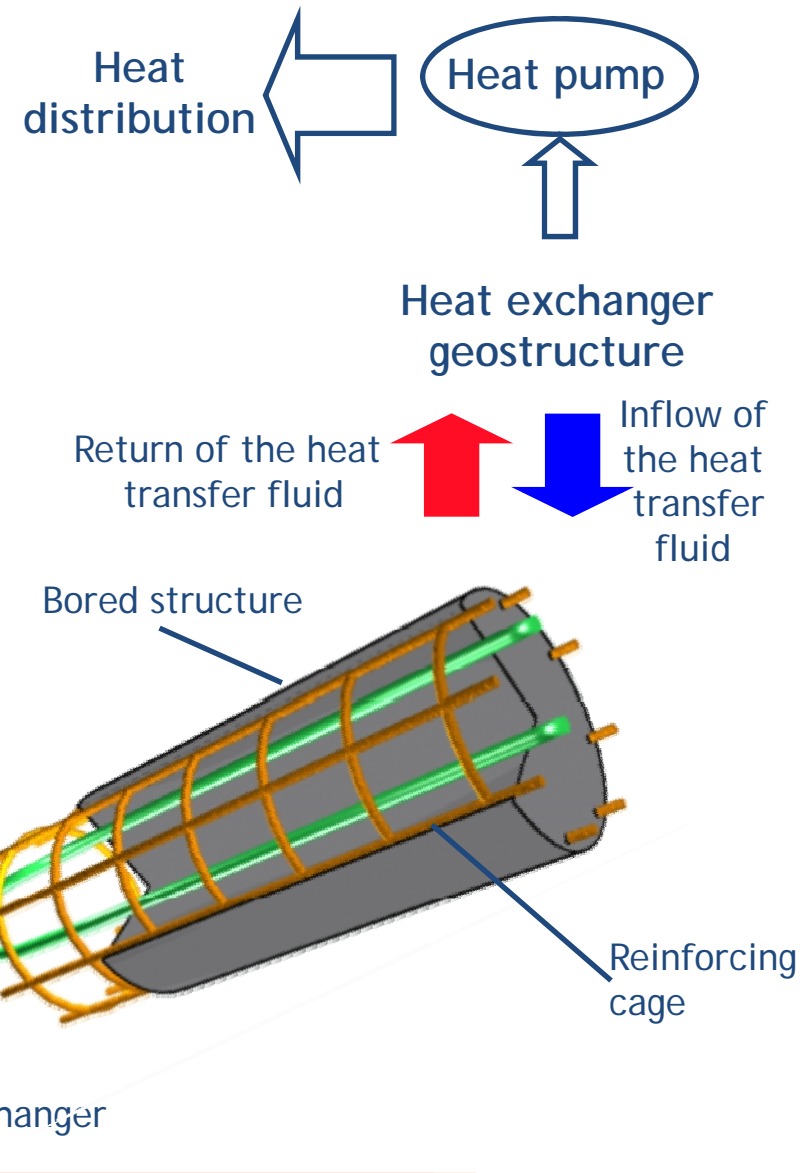
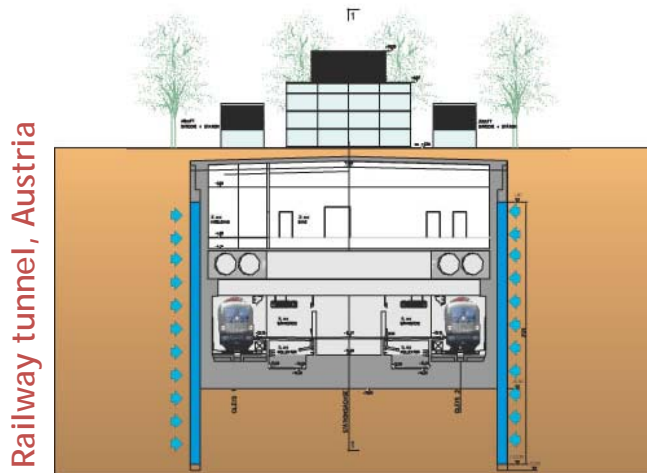


Temperature fields around
energy foundations

Principe des géostructures échangeurs de chaleur

- Utilisation de l'énergie du sol via les structures enterrées de bâtiments ou d'ouvrages
- Le transfert d'énergie se fait par un fluide caloporteur circulant dans des tubes coulés dans les pieux ou les murs
- Efficacité optimale: chaleur extraite en hiver et réinjectée en été

*Technologie en plein essor (CH, DE, AU, UK...),
et non limitée aux seuls pieux*



Géostructures énergétiques: quelques données

Quand? **Depuis le début des années 80**

Base slabs

Piles (1984)

Diaphragms walls (1996)

Tunnel lining (2009)

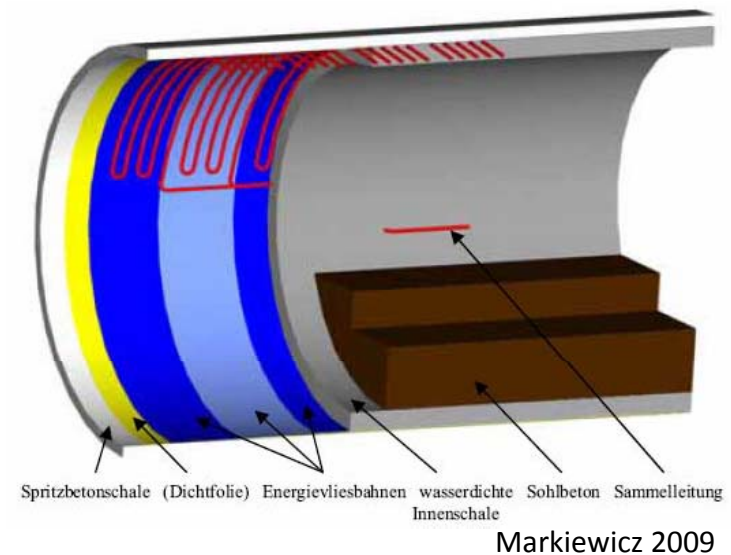


Où? **Principalement en Europe**

1980s : Autriche, Suisse, Allemagne

~ 2000 : Royaume-Uni

... : Japon



Markiewicz 2009

Combien? **Plus de 500 constructions**

Autriche > 300 (with heat piles, retaining walls...)

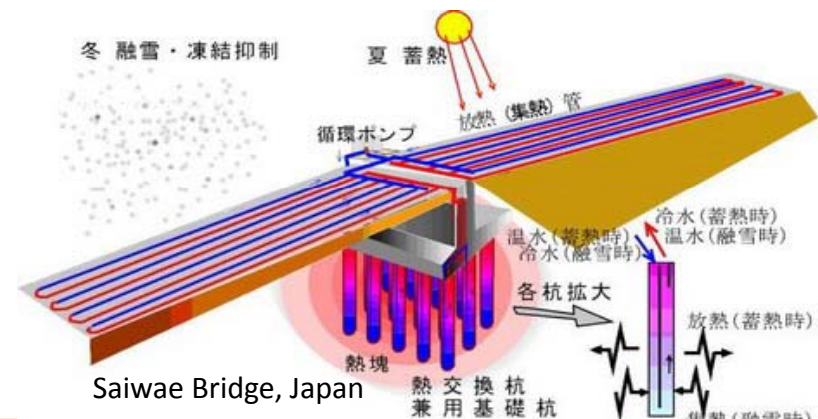
Suisse > 30 (données 2004, en hausse rapide!)

Plan

- Principes et usages des géostructures énergétiques
- Extensions possibles aux infrastructures routières
- Exemples d'applications
- Étude de 2 cas d'ancrages échangeurs de chaleur:
 - Tranchée couverte
 - Tunnel urbain
- Évaluation des systèmes pour tunnels
- Conclusions

Application possible aux ouvrages routiers

- Principes de la **géothermie faible profondeur** applicables aux infrastructures de transport:
 - Équipement dans les fondations, les renforts, les éléments structurels...
 - Utilisation de l'énergie sur place (prévention du verglas)
 - Ou dans des bâtiments proches (tunnels urbains)
- Solutions économiques et environnementales intéressantes
- Permet de sécuriser des sites dangereux (ponts, rampes d'accès)
- Le LMS travaille sur 2 projets:
 - FGU 2009-002 (ancrages énergétiques pour tunnels urbains)
 - VSS 2010-503 (fondations pour la régulation de température des routes)



Projet SERSO

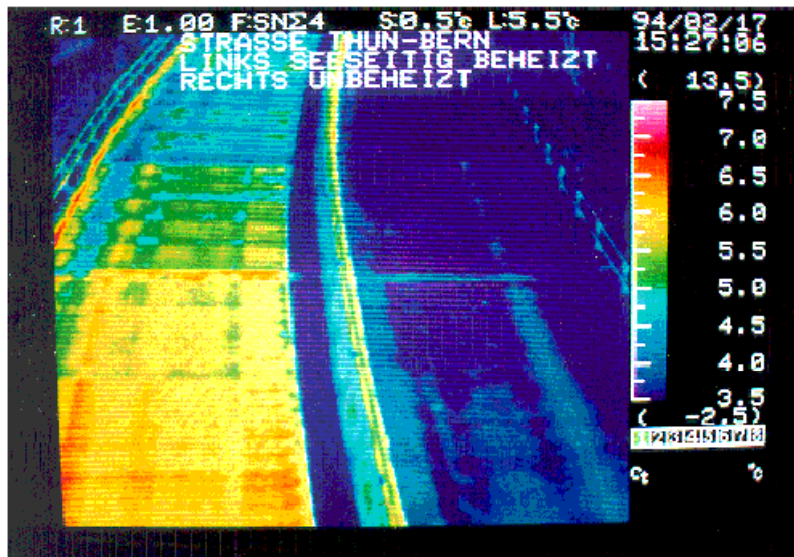
SERSO = Solar Energy Recovering from Road Surfaces



Eviter l'accumulation de neige ou glace sur l'autoroute entre Berne et Thun

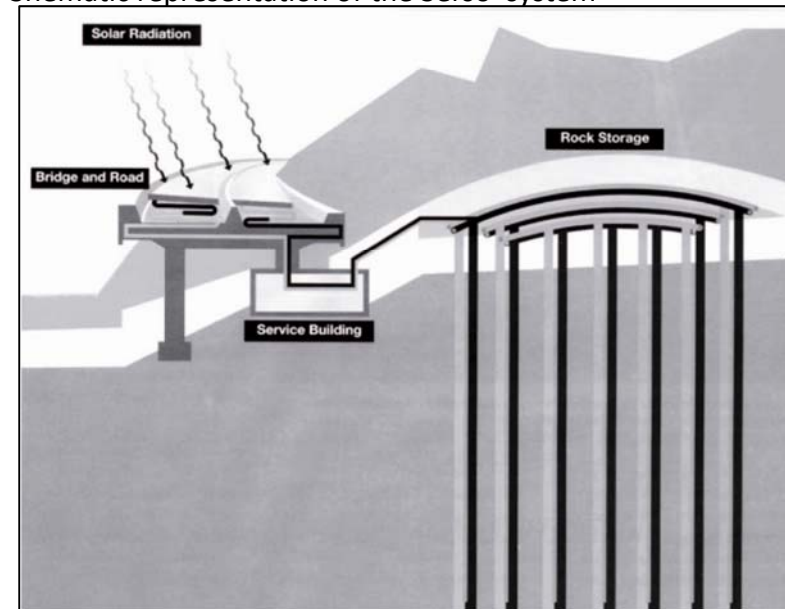
- Energie solaire collectée par un réseau de tubes à l'intérieur du revêtement de la route
- Energie transférée dans un réservoir constitué de grès (91 pieux échangeurs, volume total : 174000m³) pendant l'été

Infrared picture of the 2 sides of the road



http://www.polydynamics.ch/e/r_d/page_e_serso.htm

Schematic representation of the Serso system



Rauber (1995)

- Système en fonction depuis 1994
- Energie collectée pendant l'été: env. 155'000kWh
- 65% utilisée pour chauffer la surface du pont

Projet GAIA

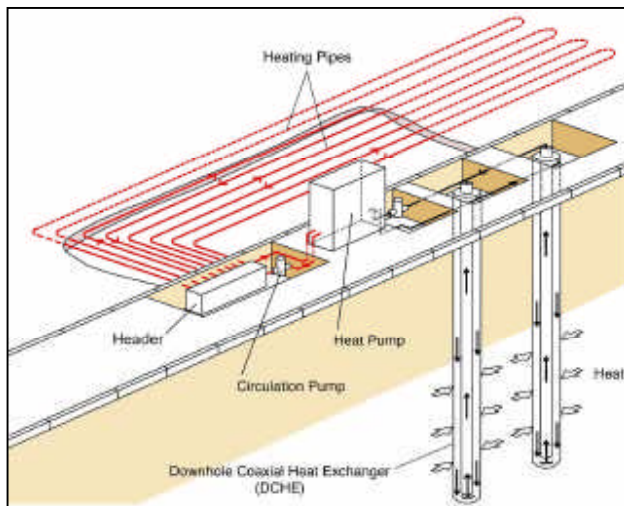
Ninohe, Japon



Eviter l'accumulation de neige ou de glace sur un tronçon de route en pente

- Energie solaire collectée par un réseau de tubes à l'intérieur du revêtement de la route
- Energie transférée dans un réservoir dans du grès (3 pieux échangeurs d'une longueur de 150.2m)
- Chauffage de la surface de la route par l'énergie stockée **ET** par énergie géothermique

Schematic representation of the Gaia system



Morita & Tago 2000

Route chauffée, pente 9%



Morita & Tago 2000

Comparaison entre le chauffage traditionnel et le système GAIA

Année	Consommation d'énergie(kWh/m ² /yr)	
	Câbles électriques	Système Gaia
1996	145.4	24.7 (17%)
1997	154.7	28.3 (18%)
1998	168.9	31.2 (18.5%)

Lainzer Tunnel

Vienne, Autriche



Récolter l'énergie géothermique par l'intermédiaire des murs de la tranchée couverte / du tunnel (2 sites tests)

Pieux énergétiques

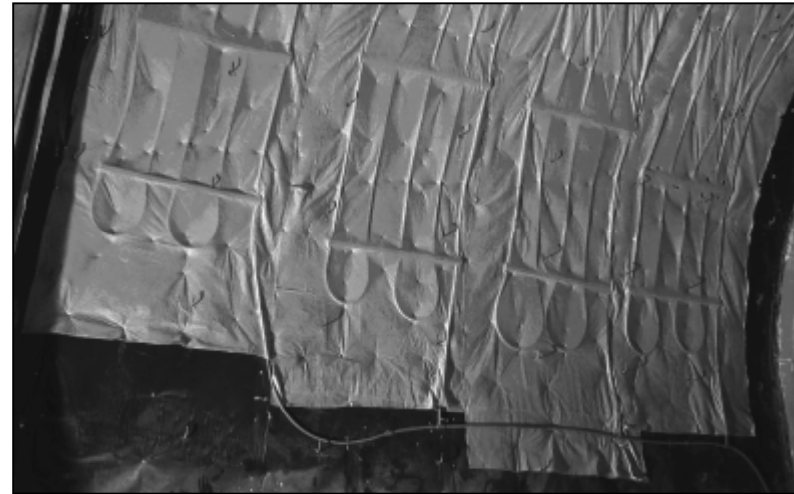
- 59 pieux ($\phi 1.5\text{m}$, 17.1m) récoltent la chaleur et la transmettent vers des pompes à chaleur
- Pendant l'hiver, 190MWh sont extraits pour fournir la totalité de l'énergie nécessaire à une école voisine

Head of the Energetic piles



Adam & Markiewicz, 2009

Absorber pipes inside the tunnel walls



Adam & Markiewicz, 2009

Parois énergétiques

- Parois équipées avec des tubes absorbants situés entre la première et la deuxième couche de béton (opération effectuée pendant la construction du cuvelage, à l'extérieur du tunnel)
- Le système peut fonctionner dans les 2 sens: extraire de la chaleur du sous sol **OU** injecter de la chaleur dans le sous-sol (et refroidir l'environnement).

Projet GeoTU6

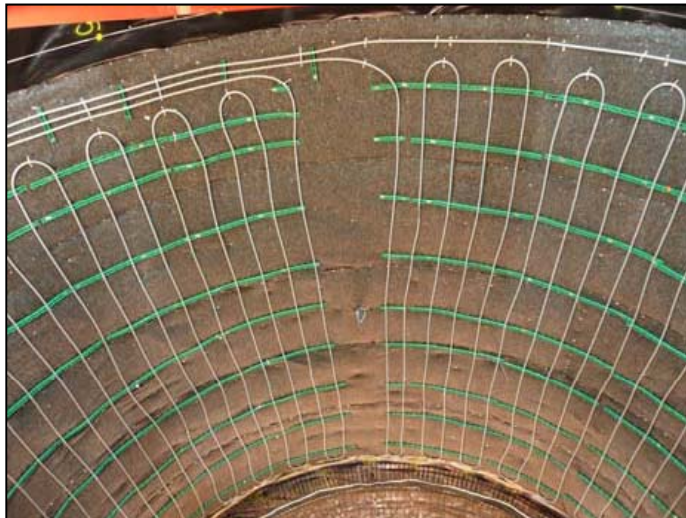
Stuttgart, Allemagne



Recueillir la chaleur à travers les parois et les pieux des galeries de métro (site test)

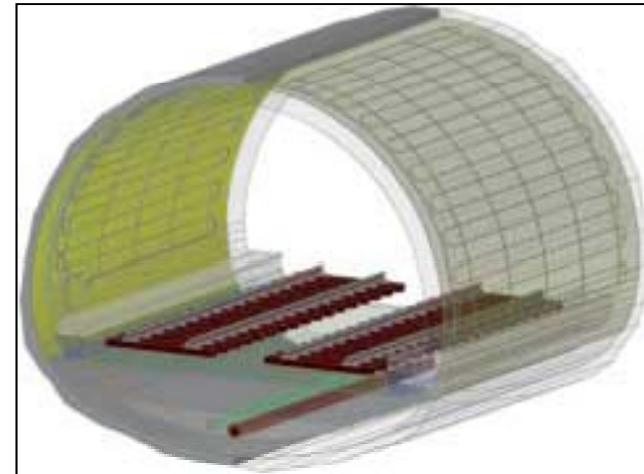
- Energie récoltée par des tubes à l'intérieur des parois, des dalles et des pieux à l'intérieur des tunnels ET des stations de métro.
- Chaleur extraite utilisée pour la climatisation des stations, des locaux techniques et pour l'aéroport voisin.

Absorber pipes inside the tunnel walls



Schneider & Vermeer

Representation of the whole heat collecting system



Schneider & Vermeer

- Chaleur extraite du réseau de tubes pour la station principale entre 516 et 705 kW.

Site	Type de géostructure	Energie extraite (pronostics)
Station principale	Pieux échangeurs (dans les parois et la dalle)	516-705 (kW)
Fildertunnel	Cuvelage énergétique ou pieux énergétiques	9 W/m ² (chauffage) -5 W/m ² (refroidissement)
Station Filder	Tubes énergétiques dans les parois	9 W/m ² (chauffage) -5 W/m ² (refroidissement)

Plan

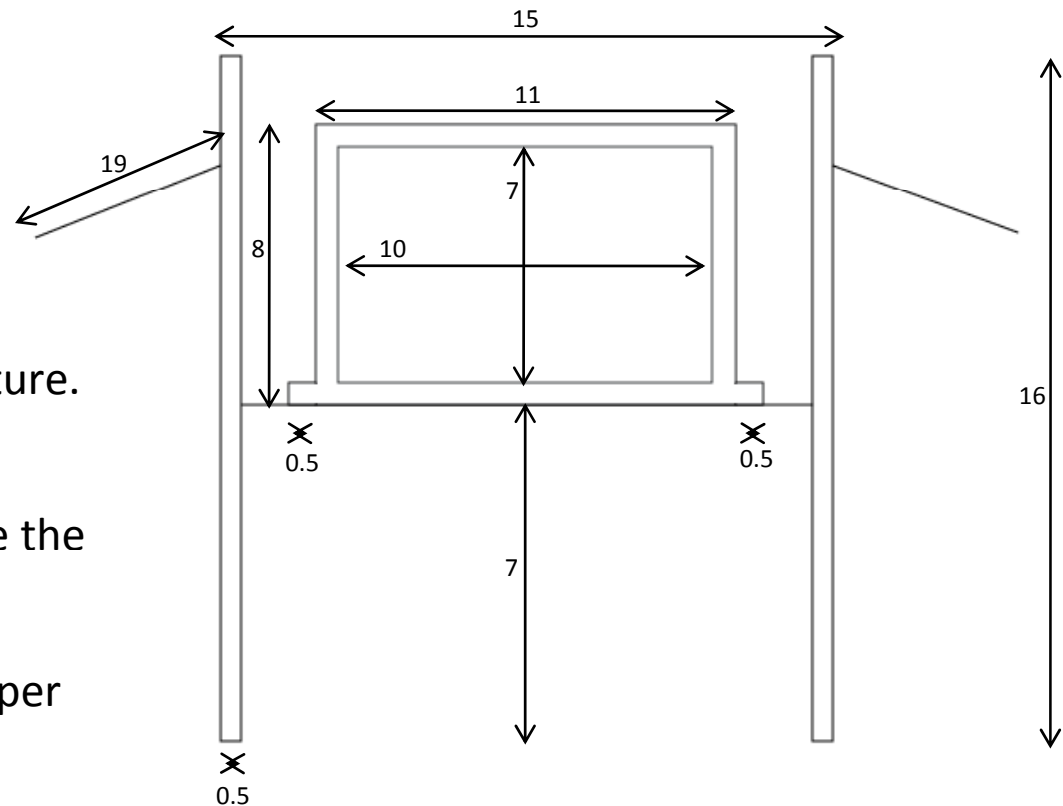
- Principes et usages des géostructures énergétiques
- Extensions possibles aux infrastructures routières
- Exemples d'applications
- Étude de 2 cas d'ancrages échangeurs de chaleur:
 - Tranchée couverte
 - Tunnel urbain
- Évaluation des systèmes pour tunnels
- Conclusions

Tranchée couverte - Construction



- Tunnel: reinforced concrete box structure.
- Cut and cover realisation: “paroi berlinoise” ; water table located above the tunnel.
- Anchors: 14 meters long; angle of 20° per respect to the horizontal.

Courbe de mobilisation du frottement axial
Bustamante *et al.* 1985



Unité: mètres

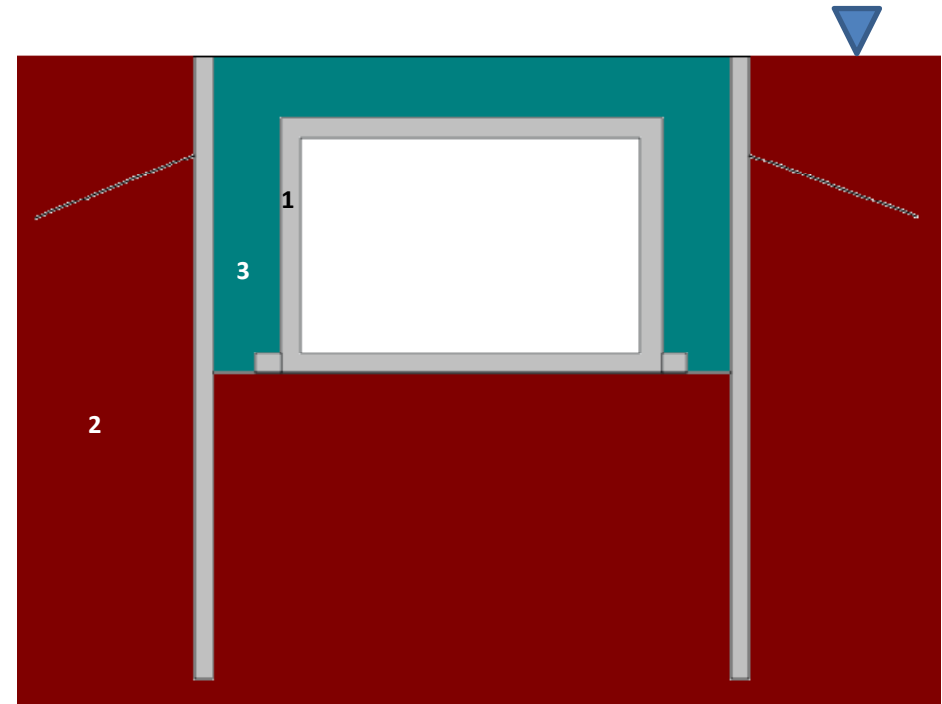
Office fédéral des routes
Indications complémentaires aux normes SIA
Edition 1998

Cut and cover tunnel - Materials



- Concrete (1): $\lambda=1.8 \text{ W/(mK)}$;
 $C_m= 2 \text{ kJ/(m}^3\text{K)}$
- Soil (2): silt ; $\lambda=2 \text{ W/(mK)}$;
 $C_m= 1.47 \text{ kJ/(m}^3\text{K)}$
- Embankment (3): $\lambda=2.5 \text{ W/(mK)}$;
 $C_m= 1.03 \text{ kJ/(m}^3\text{K)}$

Soil: Saturated

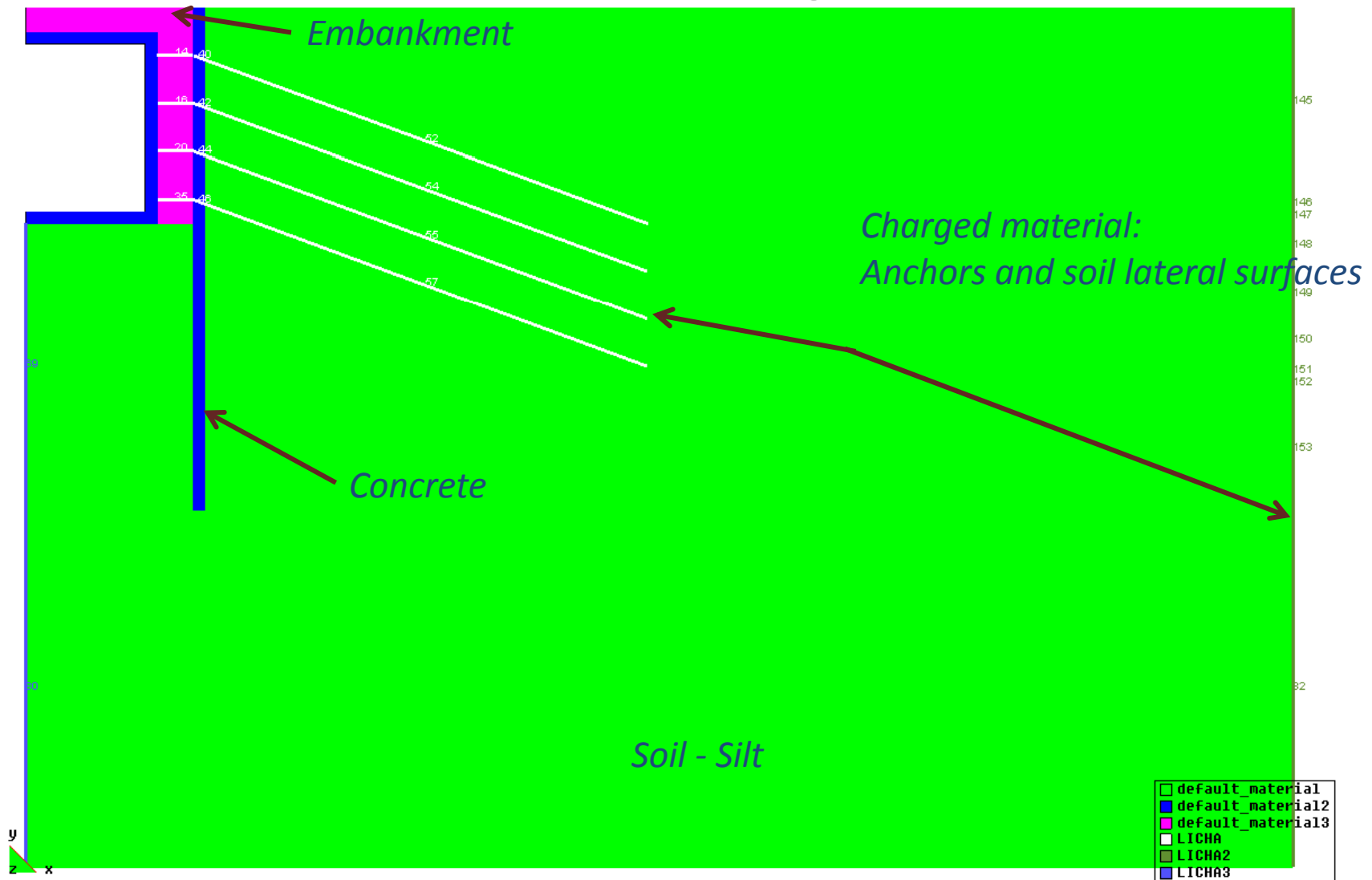


Colloque EPFZ
Computational model and charts for cut and
cover tunnels.
Kovari K. *et al.*

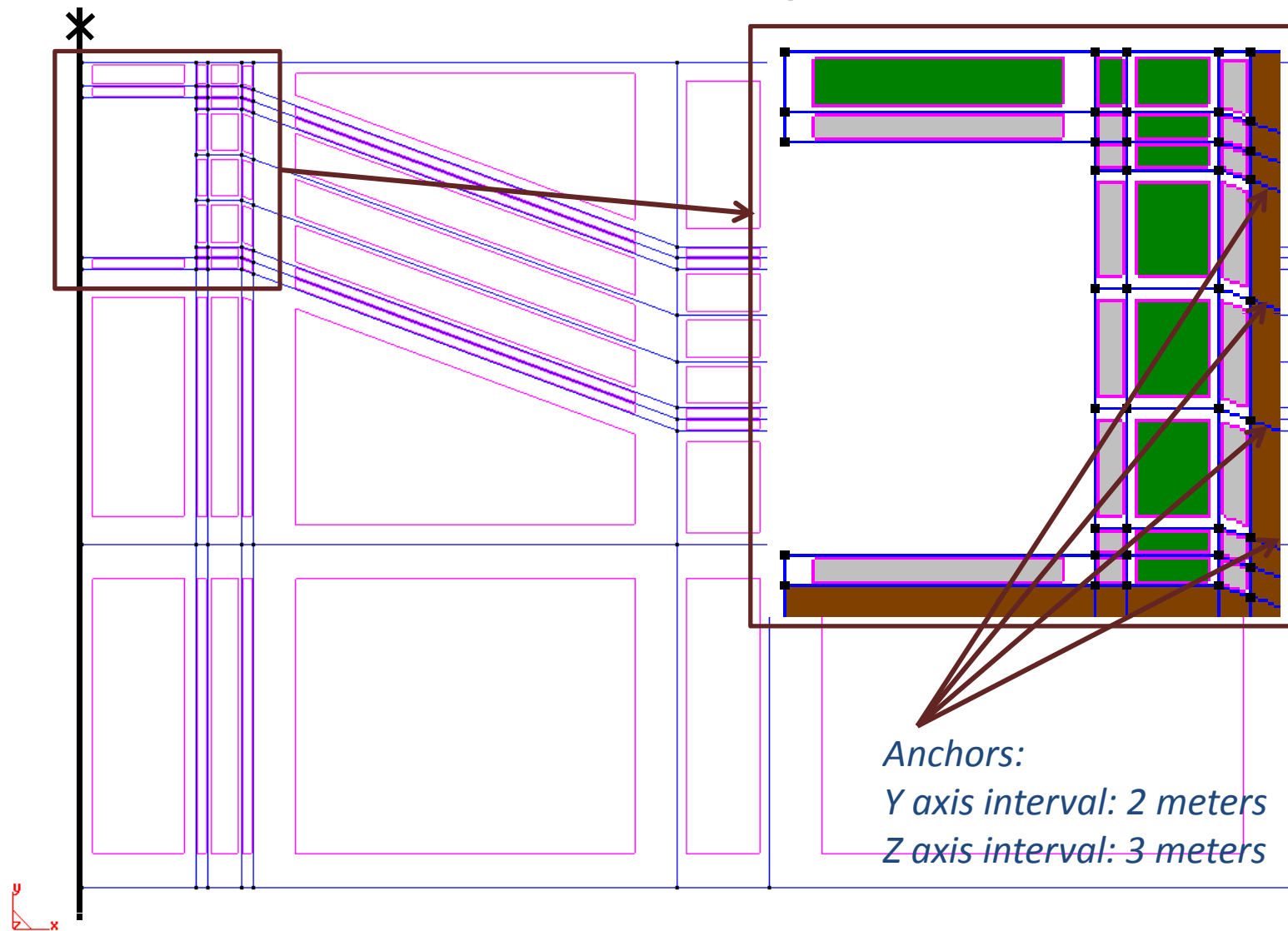
SIA D0190
Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de
fondation et de soutènement en béton

Thèse EPFL 3714
Interaction sol structure dans le domaine des tranchées
couvertes
Plumey S.

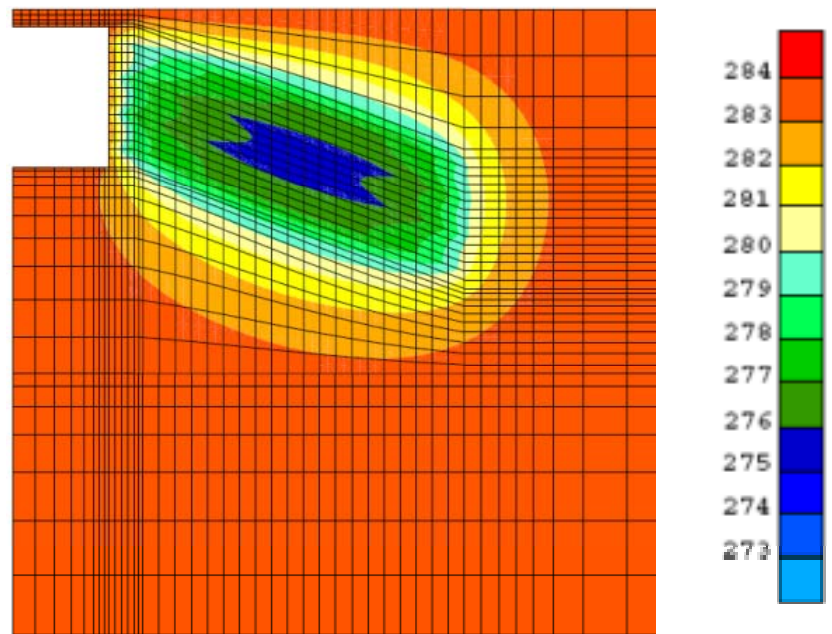
Tranchée couverte - Maillage 2D - Matériaux



Tranchée couverte - Maillage 2D - Géométrie

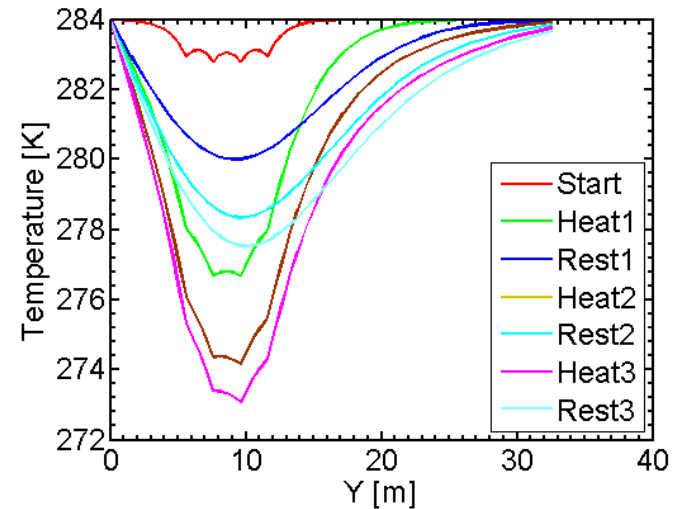


Évolution de la température pour la tranchée

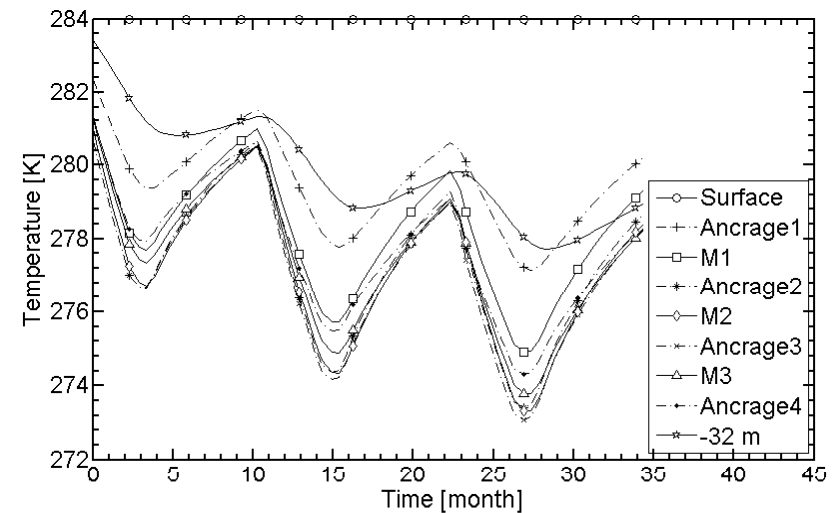


Carte des températures (second hiver)

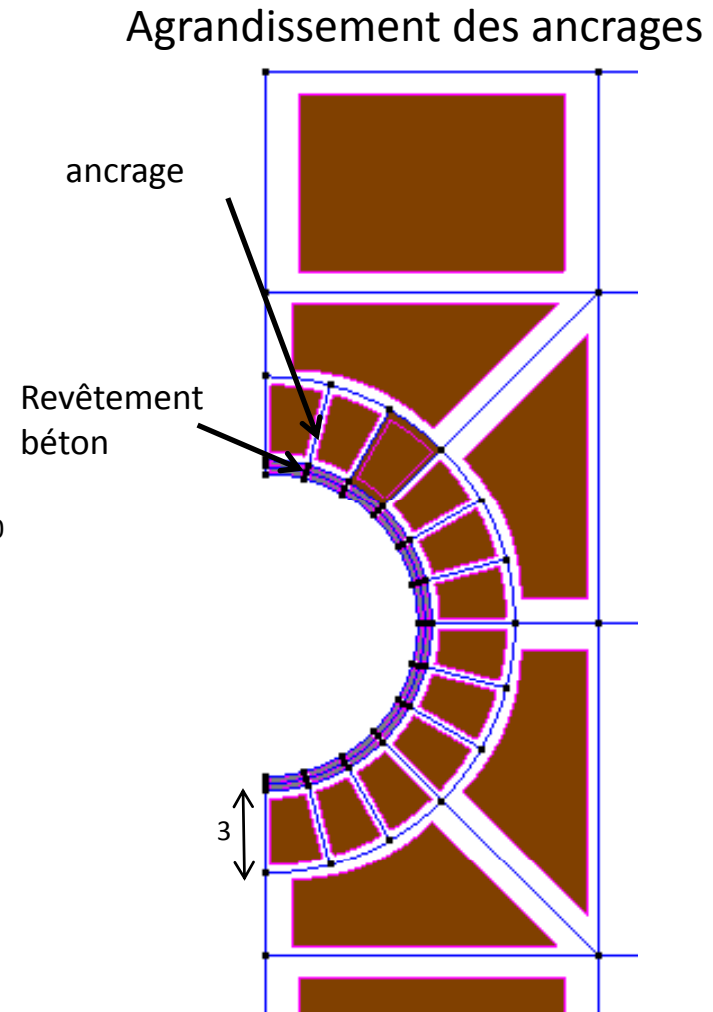
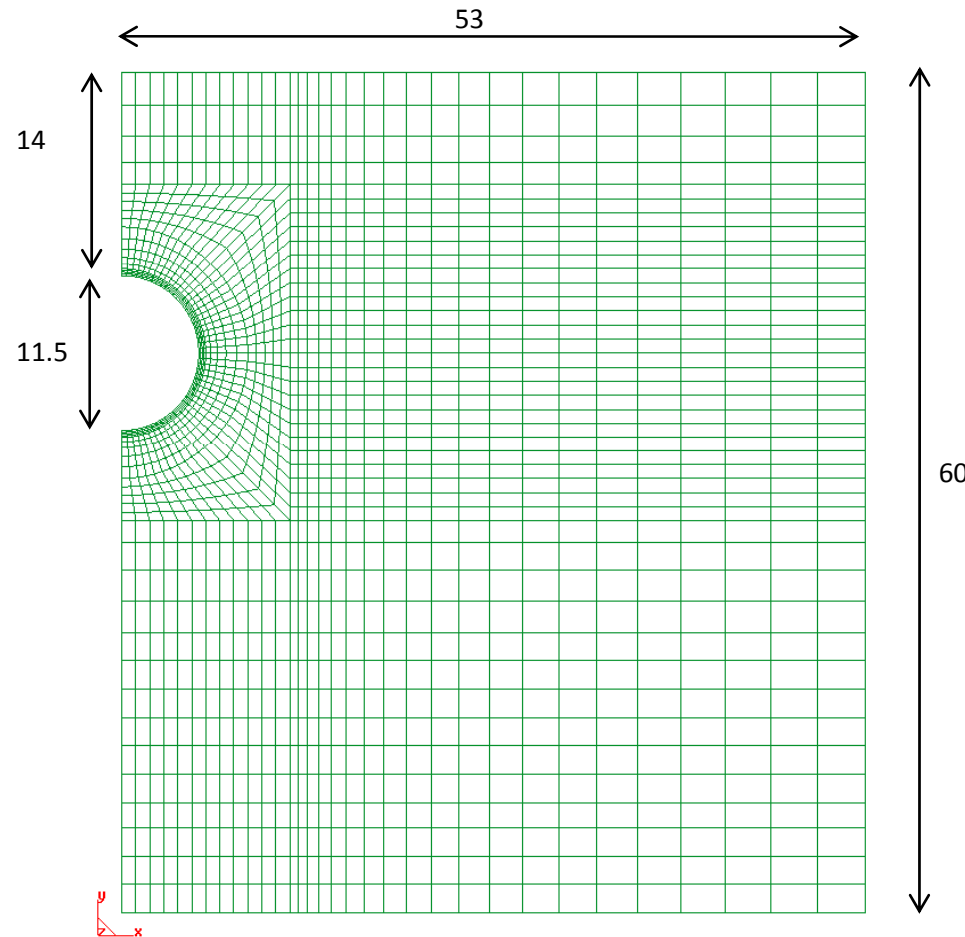
Puissance moyenne saisonnière: 12 W/m



Profil vertical à mi-ancrages

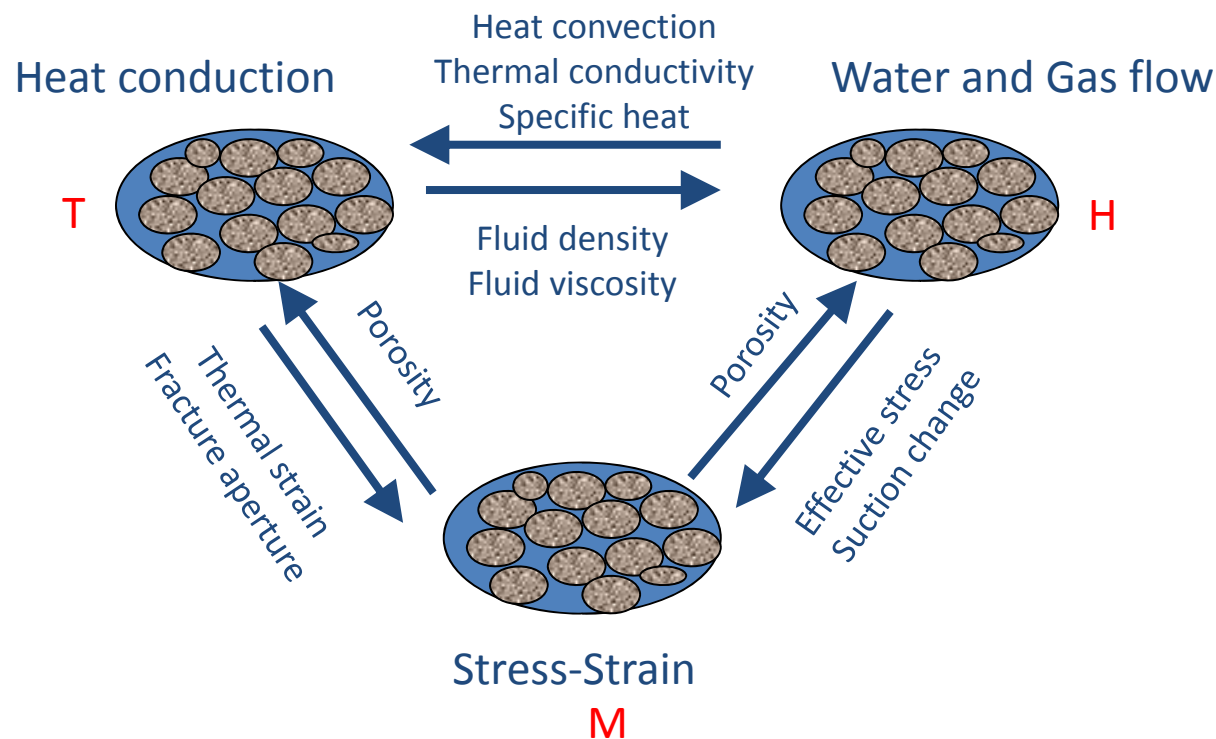


Tunnel urbain - Maillage

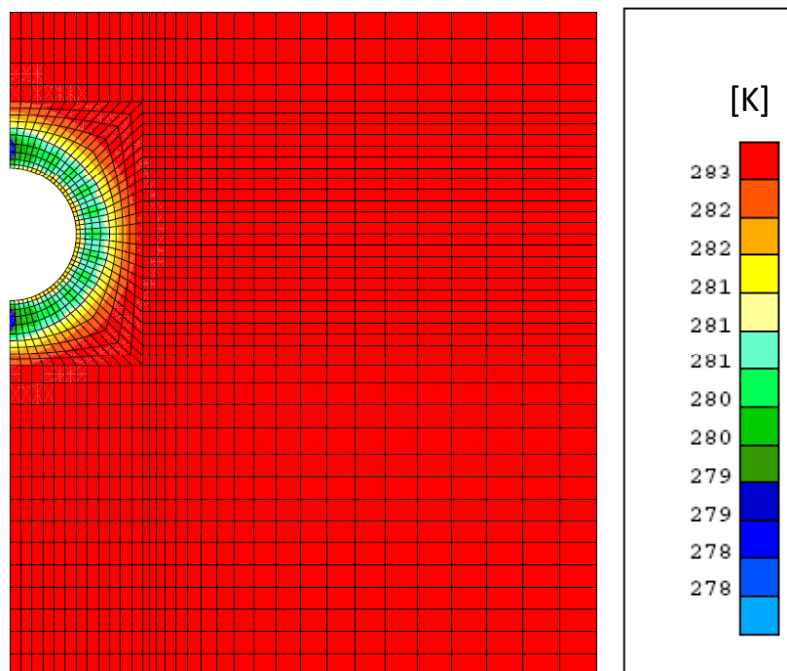


TH(M) behavior of soil/energetic geostructure

- Numerical tool: Lagamine finite element code.
 - Coupled formulation: displacements, pore water pressure and temperature are the field variables. Requires boundary and initial conditions

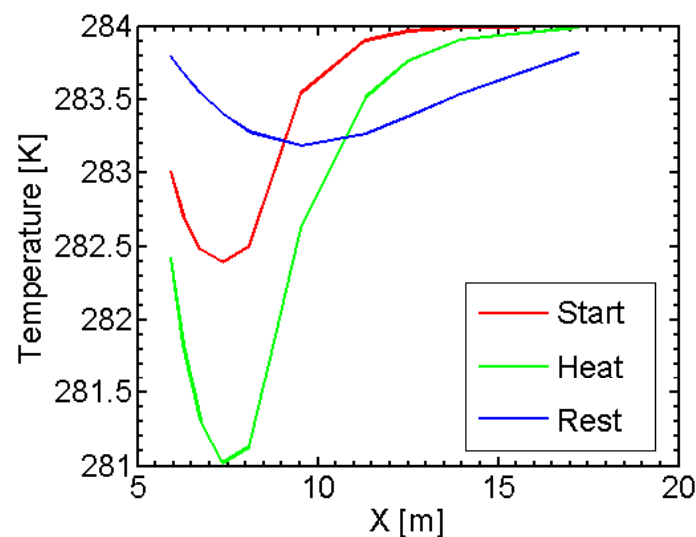


Résultats

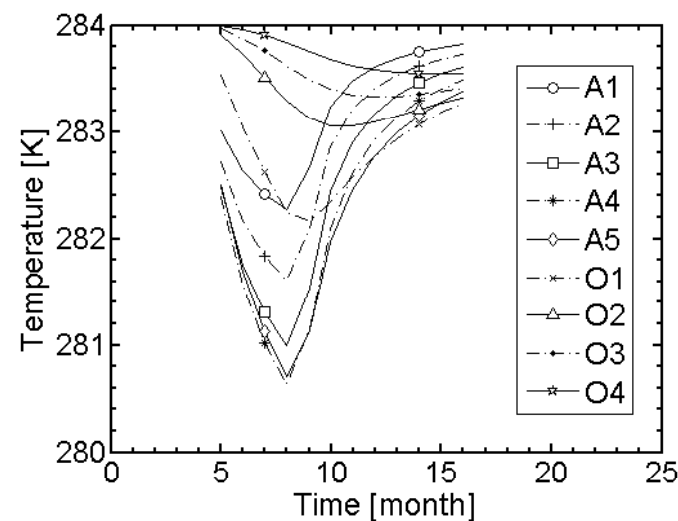


Puissance moyenne saisonnière. 6W/m

Les effets mécaniques sont en cours d'évaluation, inférieurs à 1MPa



Profil horizontal radial



Plan

- Principes et usages des géostructures énergétiques
- Extensions possibles aux infrastructures routières
- Exemples d'applications
- Étude de 2 cas d'ancrages échangeurs de chaleur:
 - Tranchée couverte
 - Tunnel urbain
- Évaluation des systèmes pour tunnels
- Conclusions

Evaluation des différents systèmes applicables aux tunnels

Rapport FGU 2008/006 – AMBERG Eng. / Geowatt

Objectifs:	Evaluation, faisabilité et rentabilité de l'installation de géostructures énergétiques dans le cadre de tunnels urbains.
Moyens:	Etudes des modes et lieux d'installation Analyses de projets existant (exemples précédents) Analyse de l'applicabilité aux tunnels inter-urbains Simulation des différents modes d'exploitation (chaleur+/- froid) et des différents paramètres (nombre, longueur des ancrages), forme du tunnel...
Projet pilote	Une section de tunnel dans le tunnel Hagerbach (SG -CH) est proposée

Questions principales

Conductivité thermique

Suffisance sur le long terme

Limites d'extraction

Influence des variations saisonnières et journalières

Projet réaliste

Efficacité du système absorbant

Intégration dans le projet de tunnel

Rendement général

Construction

Durée supplémentaire des travaux

Coûts supplémentaires des travaux

Possibilité de rénovation de tunnels existants

Efficacité / Rendement

Gain versus Pertes d'énergie

Longévité des infrastructures géothermiques

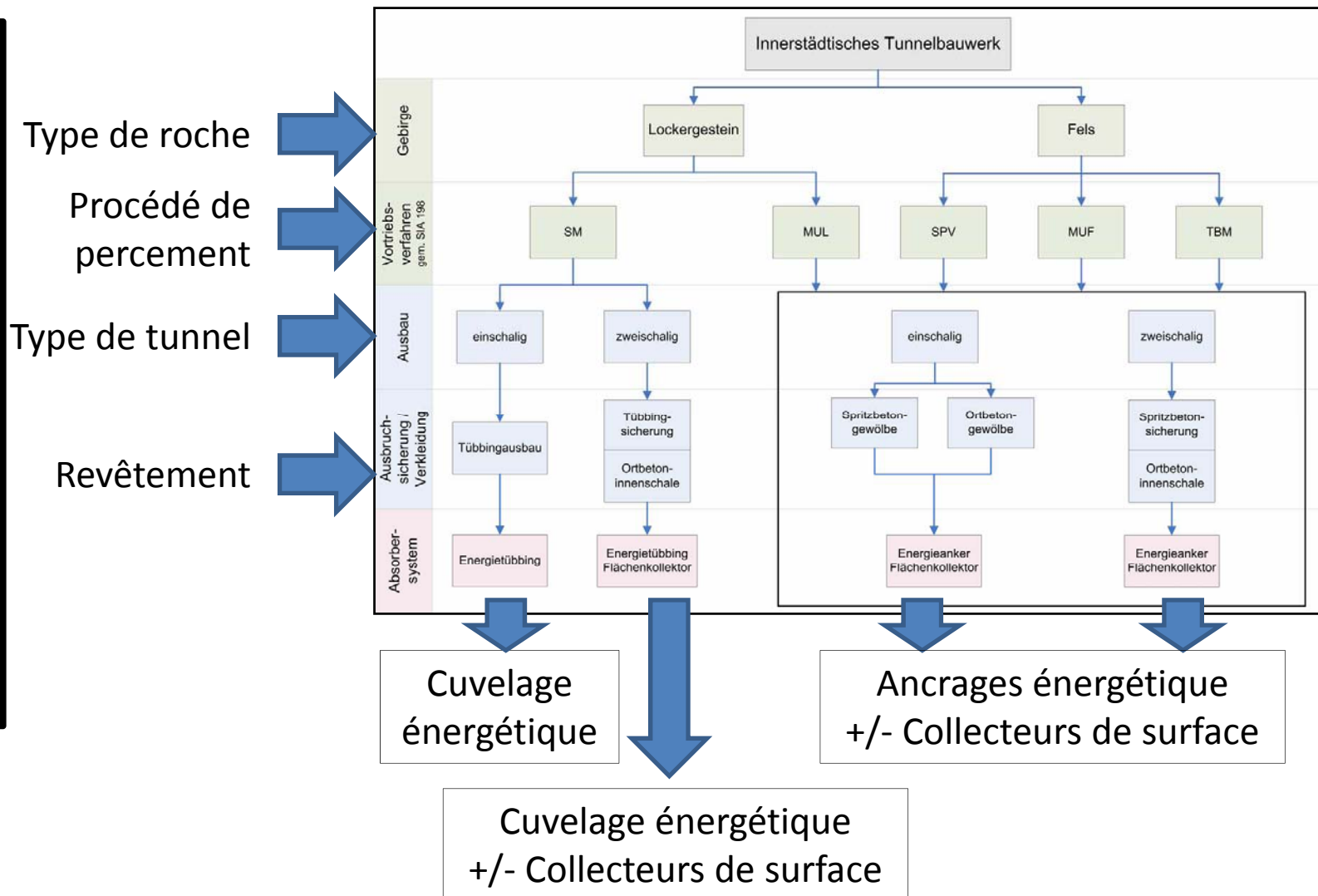
Paramètres environnementaux

Liste de questions

	Géothermisch	Konstruktiv	Baumethodisch	Wirtschaftlich	Beantwortet in
Ist das System thermisch nachhaltig (Nutzungsszenario), d.h. fließt genug Wärme nach, um auch nach (10) 20 Jahren noch genügend Wärme entziehen zu können?	x				3.3.4
Wie gross ist die maximale Energieausbeute und durch welche Anforderungen wird sie begrenzt (keine Auswirkungen auf Dauerhaftigkeit des Tunnels)?	x	x	x		3.3.10
Wie flexibel ist ein Absorbersystem, kann es Spitzen abdecken?	x				3.3.4
Wie beeinflussen saisonale Schwankungen den Energiegewinn?	x				Pilot-projekt
Wie und wie gut ist die Temperatur des Baugrundes auf das Absorberelement übertragbar?	x	x	x		Pilot-projekt
Wie hat ein Absorberelement, -system auszusehen?	x	x	x	x	3.2.3
Wo kann es in den Tunnel integriert werden?		x	x		3.2.2
Möglichkeit eines zeitlich etappierten Ausbaus des Tunnels mit Absorbersystemen, modularer Aufbau des Absorbersystems.	x	x	x		3.3.9 3.2.3
Vergleich Absorbersysteme und weitere konkurrierende Systeme (Erdwärmesonde).	x			x	3.4
Wo können die Anschlüsse und Versorgerleitungen untergebracht werden?		x	x		Pilot-projekt
Wie müssen der Einbau und die Anordnung erfolgen, so dass es zu keiner Bauzeitverlängerung kommt?			x		3.2.3
Wie kann das System ausgelegt werden, so dass es den Baubedingungen im Tunnelbau gerecht wird?			x		3.2.3
Wie können bestehende Tunnel nachgerüstet werden?			x		3.2.3
Wie kann die Wartung und Instandsetzung erfolgen?		x			Pilot-projekt
Wie muss die Abnehmerstruktur beschaffen sein, um die Tunnelwärme möglichst ohne Verluste tatsächlich nutzen zu können?				x	3.2.1
Dauerhaftigkeit, hydraulische Nachhaltigkeit?		x			Pilot-projekt
Wie werden die Anschlussleitungen und die Hydraulik gesteuert und von wo aus?			x		Pilot-projekt
Mit welchen Investitionskosten muss für eine geothermische Anlage im Tunnelbau gerechnet werden?				x	3.4
Wie können der Einbau, die Wartung und der Betrieb des Absorbersystems möglichst störungsfrei für den eigentlichen Zweck des Tunnels erfolgen?			x		Pilot-projekt

Type de géostructures

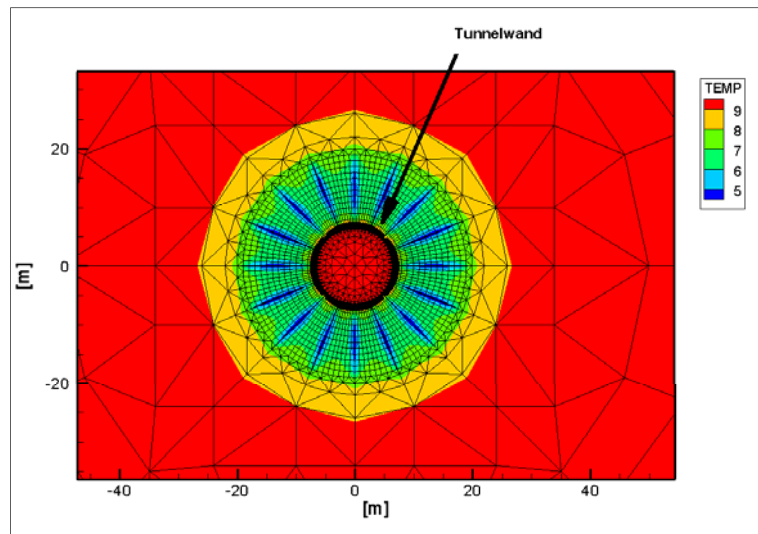
Caractéristiques liées au sous-sol



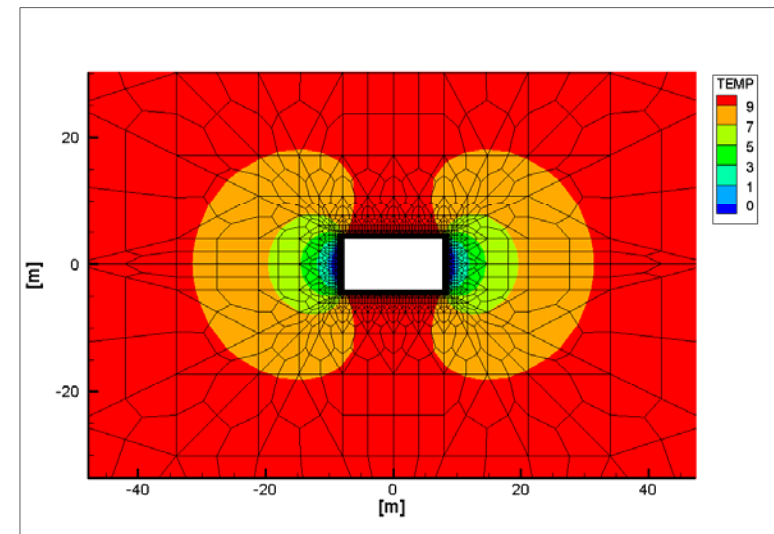
Type de géostructures

Considérations environnementales (exploitation sur le long terme)

(Répartition des températures après 50 ans d'exploitation en mode bivalent)



Ancrages énergétiques



Collecteurs de surface

Estimation des capacités d'extraction

	Absorbersystem	Tunnel	Nutzungsart H: Heizen K: Kühlen	Abstände zwischen Systemen	Isolationsschicht gegen Tunnel	Wärmeentzug pro Anker- meter / Absorberfläche	Maximale Leistung pro Anker- meter / Absorberfläche
			-	m	-	kWh/m bzw. kWh/m ²	W/m bzw. W/m ²
Ancrages	Anker 16 x 12 m	rund, D=14 m	H	5	-	60	35
			H+K	5	-	80	45
			H	>10	-	85	45
			H+K	>10	-	90	50
	Anker 32 x 6 m	rund, D=14 m	praktisch gleiche Resultate wie bei 16 x 12 m				
Collecteurs de surface	Flächenkollektor 2 x 8 m	rechteckig, H x B = 8 x 15.5 m	H		10 cm	41	22
			H		3 cm	*50	*25
			H		1 cm	*75	*40
			H		-	120	64
			H+K		10 cm	44	24
			H+K		3 cm	*50	*25
			H+K		1 cm	*80	*40
			H+K		-	126	67
	Flächenkollektor rundum	rund, D=14 m	H		10 cm	30	16
			H		3 cm	*40	*23
			H		1 cm	*65	*36
			H		-	107	57
			H+K		10 cm	35	19
			H+K		3 cm	*45	*25
			H+K		1 cm	*70	*35
			H+K		-	112	60

Extraction de chaleur par mètre
d'ancrage / m² de collecteur de
surface (kWh/m respec. kWh/m²)

Puissance d'extraction maximale
par mètre d'ancrage / collecteur
de surface (W/m respec. W/m²)

Conclusions

- Les technologies d'extraction d'énergie pour les usages routiers sont en plein essor
- Le choix le plus économique semble être les dispositifs de surface
- Les températures considérées ont peu d'influence mécanique
- L'efficacité est dépendante d'une bonne gestion de la température du sol
- Les pertes importantes empêchent un stockage efficace, mais en cas de présence d'un flux d'eau facilitent le retour à l'équilibre.
- Les puissances faibles relativement aux pieux limitent les usages de grande ampleur
 - L'utilisation pour le dégel des routes / pour limiter les effets de l'ensoleillement semble la plus prometteuse